

トロリ線着霜時の集電状態の再現試験手法

久家 広嗣* 白田 隆之* 鎌田 慈**

Test Method for Simulating Current Collecting State in the Case of Frozen Contact Wires

Hirotsugu KUGA Takayuki USUDA Yasushi KAMATA

Authors have developed a way to simulate frost on contact wires. In this study, firstly we investigated the dynamic behavior of a contact strip sliding on the contact wire with frost. Secondly, we proposed a test method for simulating frost by using alum. Then we compared the sliding characteristics of the contact strip between alum and frost. Thirdly, we proposed a test method for estimating pantograph head damage due to arcing by using pantograph test equipment and a scale reduction model of the pantograph head. The feature of the simulated damage by this method is consistent with that observed on commercial lines. These test methods are useful for estimating the effect of countermeasures against various problems due to frost on contact wires.

キーワード：パンタグラフ、トロリ線着霜、離線、アーク、舟体損耗、模擬試験

1. はじめに

冬季の晴れた夜間には、トロリ線の表面に霜が発生することがある。トロリ線に霜が発生した区間を電車が走行すると、パンタグラフとトロリ線の間に霜が介在することでアークが多発する¹⁾。このアークは、パンタグラフやトロリ線に電氣的・熱的な損傷を与えるが、損傷の程度は、トロリ線に比べてパンタグラフの方が顕著である。現在、このようなトロリ線着霜に起因するパンタグラフの損傷への対策として、始発電車走行前の霜取列車運行や、始発電車のノッチ制限などが実施されているが、前者については霜の除去効果が十分とはいえない場合があること、後者については列車を遅延させてしまうこと、などの問題があり、鉄道事業者にとってトロリ線着霜の問題は未だに深刻な課題となっている。近年、霜の発生予測手法に関する研究が進められており¹⁾、トロリ線着霜の再現試験も可能であるが、これには低温室などの特殊な装置・環境が必要なことから、トロリ線着霜時のパンタグラフのしゅう動状態をより簡易に模擬できる手法の開発が望まれている。

このような背景から、まずはトロリ線着霜がパンタグラフのしゅう動状態に与える影響を明らかにするため、恒温箱内でトロリ線に人工的に霜を発生させ、霜のせん断付着力と気温・霜の成長量などとの関係を調査した。次に、トロリ線着霜時のパンタグラフのしゅう動状態を常温環境において模擬する手法として、霜の代替物質を用いる手法について検討した。また、アークにより生じ

るパンタグラフの損耗を定置試験により再現することを目的として、架線・舟体間に強制的にアークを発生させ、アークによる舟体損耗を再現する試験手法を検討した。これらの詳細を以下の章で報告する。

2. トロリ線着霜時のしゅう動状態の調査

本章では、人工的に霜を発生させたトロリ線とすり板とのしゅう動状態を調査した結果を述べる。

2.1 着霜再現の原理

図1に飽和水蒸気濃度の温度依存性を示す。同図の曲線右側は水蒸気濃度が未飽和の領域、左側は過飽和の領域である。ここで、気温0℃、相対湿度98%の空气中に(図1の×印)、地面からの放射冷却によって氷点下温度(ここでは-10℃)に冷やされたトロリ線(図1の●印)があるとすると、トロリ線近傍の空气中的水蒸気濃度は飽和水蒸気濃度よりも高くなり、飽和水蒸気濃度との差分(図1の①)が、霜となってトロリ線表面に付着

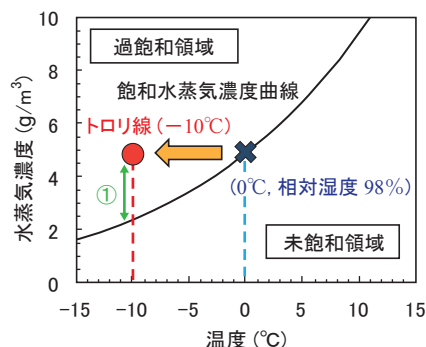


図1 飽和水蒸気濃度曲線の一例と着霜原理²⁾

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

** 防災技術研究部 気象防災研究室

特集：電力技術

する。これが、トロリ線着霜のメカニズムである。そこで、温度（気温）、相対湿度および対象物温度（トロリ線温度）の3条件を人為的にコントロールすれば、トロリ線表面に霜を人工的に発生させることが可能となる。

2.2 模擬トロリ線

トロリ線に霜を付着させるためには、トロリ線を周囲温度よりも低い温度に冷却する必要がある。そこで、実物のトロリ線ではなく、銅パイプ（以下、模擬トロリ線と表記）を使用して、その内部に温度制御用の冷却液を流すことにした。この模擬トロリ線は、材質がりん脱酸銅、外径が16mm、肉厚が3mm、長さが1,200mmであり、しゅう動面として幅5mmの切削加工を施している。本章では、しゅう動面粗さの影響も調査するために、#120、#400、#1000の番数の研磨紙で模擬トロリ線のしゅう動面を研磨した。なお、研磨紙の粗さは、#120が最も粗く、#1000が最も細かい。

2.3 着霜再現試験装置

図2に示すように、着霜再現試験装置は恒温箱、循環型恒温槽、水蒸気供給部、模擬トロリ線から構成される。恒温箱内の気温は低温実験室内の冷気導入とヒータにより調整し、湿度は水蒸気供給部により調整する。模擬トロリ線の温度は、循環型恒温槽で模擬トロリ線の内部へ循環させる冷媒の温度を制御することにより調整する。本装置では、模擬トロリ線を最大4本設置可能である。

2.4 霜付着力測定試験装置

すり板のトロリ線しゅう動を模擬する霜付着力測定試験装置を図3に示す。着霜させた模擬トロリ線の本装置に取り付け、すり板を移動させることによって模擬トロリ線としゅう動させた。その際、加速度計、ロードセルにより前後及び上下方向のすり板の加速度、ならびにすり板と模擬トロリ線との間の前後力、接触力、離線信号をそれぞれ測定した。すり板の静押上力は54Nに設定した。また、離線判定は模擬トロリ線とすり板間に9Vの電池を結線し、着線時に9V、完全な離線時に0Vが出力される電気回路を構成することによって行った。すり板は、図4、図5に示す鉄系焼結合金すり板TF5A及びメタライズドカーボンすり板PC78Aを用い、各すり板の寸法は幅25×25mm、高さ10mmである。なお、着霜再現試験装置ならびに霜付着力測定試験装置は、塩沢雪害実験所の低温室内に設置しており、しゅう動試験の際に試験室の温度を一定に保っている。

2.5 試験方法

模擬トロリ線の霜の成長条件は、恒温箱内気温-5～-1℃、相対湿度98%、模擬トロリ線温度-15～-5℃と

した。試験前に模擬トロリ線表面を脱脂し、着霜再現試験装置に設置後、霜を6～15時間成長させた。着霜後、模擬トロリ線を霜付着力測定試験装置に取り付け、すり板によるしゅう動試験を実施した。すり板のしゅう動最高速度は1.5m/s、加減速時の加速度は4.5m/s²である。測定データからすり板が一定速度でしゅう動した区間の前後力及び接触力の平均値、標準偏差を算出した。サンプリング周波数は2kHzとした。また、同一の条件に対して3～5回の試験を行い、前後力などについて平均値を算出した。なお、着霜再現試験、霜付着力測定試験ともに低温室内で実施し、室温を-14～-6℃の範囲で制御した。

2.6 試験結果

本試験では、すり板のしゅう動時に、わずかな時間でも離線が発生した試番を離線発生試番とした。また、前後力や接触力の集計は、上記離線が発生していない試番を対象とし、各試番毎にすり板が最高速度でしゅう動している区間で前後力、接触力の平均値を求めて各試番毎の前後力、接触力とした。これら各試番毎の前後力や

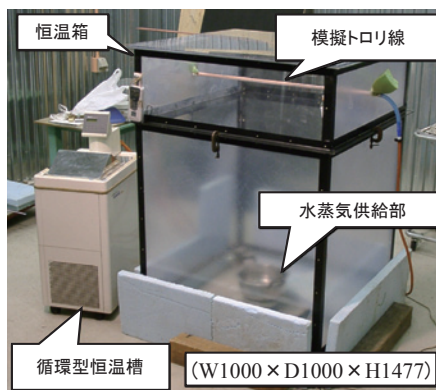


図2 着霜再現試験装置

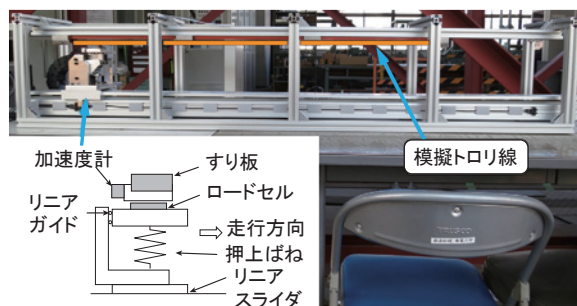


図3 霜付着力測定試験装置

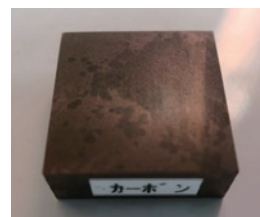
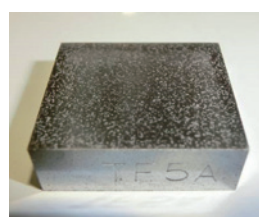


図4 鉄系焼結合金すり板 図5 カーボン系すり板

接触力を、同一試験条件でまとめてさらに平均化した値を、改めて前後力平均値、接触力平均値として算出した。

図6に霜成長時の恒温箱内気温と前後力平均値との関係を示す。プロットは平均値を、縦棒は標準偏差を示す。同図に示すように、いずれのすり板種別、模擬トロリ線のしゅう動面粗さにおいても霜成長時の恒温室内気温が低い方が、前後力が大きい。この理由は、気温が低いほど霜の付着強度が大きくなるためと考えられる。また、同じ気温で比較すると、模擬トロリ線のしゅう動面が粗い方が、前後力は小さい。これは、しゅう動面が粗い方が、しゅう動面の凹凸の隙間に霜が残りやすく、すり板との接触面における霜の面積が増え、しゅう動摩擦が小さくなるためと推測される。図7は霜成長時の気温毎に、総試験数に対して離線が発生した試験数の割合を示す。離線発生試験数の割合は、霜成長時の気温が低い場合に高い。この原因も図6の結果と同じく、気温が低いほど霜の付着強度が強くなるためと考えられる。また、霜成長時の気温が同じ条件で比較すると、#400と#1000の結

果では大きな差は見られないが、模擬トロリ線しゅう動面が粗い程、離線発生試験数の割合が高くなる傾向が推測される。なお、TF5Aすり板を使用した試験では全試験で離線が発生したため、図示していない。図8は、前後力と離線発生試験数の割合の関係を示す。同図より、同じしゅう動面粗さの条件で比較すると、前後力の増加と共に離線発生試験数の割合が増加する傾向が確認される。

3. 代替物質による着霜再現としゅう動試験

本章では、しゅう動面に霜の代替物質を塗布した模擬トロリ線のしゅう動試験に関して述べる。

3.1 霜の代替物質の選定

2章の着霜再現試験では、気温を低温に保つ環境室を必要とし、なおかつ霜の発生範囲も1m程度の模擬トロリ線に限定される。霜を何らかの代替物質で模擬することにより、常温環境下でトロリ線着霜時のトロリ線やすり板の動的挙動を調べることができれば、非常に有用である。そこで、本章では、簡易にトロリ線着霜が再現可能な代替物質を検討した。

霜の付着は水分子と固体表面に位置する原子との間に形成される水素結合やファンデルワールス力などにより生じると推測され²⁾、氷と金属とのナノスケールでの付着力の検討も実施されているが³⁾、代替物質で霜と金属の結合状態を完全に再現することは容易ではない。そのため、本研究ではトロリ線着霜状態におけるすり板の機械的なしゅう動状態を簡易に模擬することを主眼に、代替物質を選定した。トロリ線着霜の再現方法は、化合物を溶かした高温の水溶液をトロリ線しゅう動面に塗布し、温度低下により化合物結晶をトロリ線に析出させる方法とした。代替物質の選定は以下の条件の下で行った。

- ・取り扱いが簡易で、人体に対する危険性が低い。
- ・容易かつ安価に入手可能である。
- ・溶媒の温度上昇に伴い、溶解量が大きく増加する。

その結果、本試験では以下の代替物質を使用した。

- ①塩化アンモニウム（化学式： NH_4Cl ）
- ②スクロース（グラニュー糖で代用。化学式： $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ）
- ③硫酸カリウムアルミニウム十二水和物（以下ミョウバンと表記。化学式： $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ）

表1にこれら化合物の溶解度を示す。80℃の水100mlに溶解量分溶かして水溶液を生成した。各水溶液を、長さ1mのGT110トロリ線にハケで塗布し、そのまま常温下で冷却させて化合物を析出させる予備試験を行った。図9に析出結果を示す。塩化アンモニウムの結晶は外観上は霜と類似しているが、表面が青色に変色している。この理由は塩化アンモニウムによる銅の酸化反応と推測される。スクロースは、水飴のような状態になり、

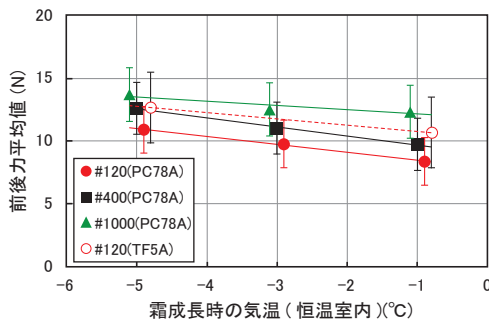


図6 霜成長時の気温と前後力平均値の関係

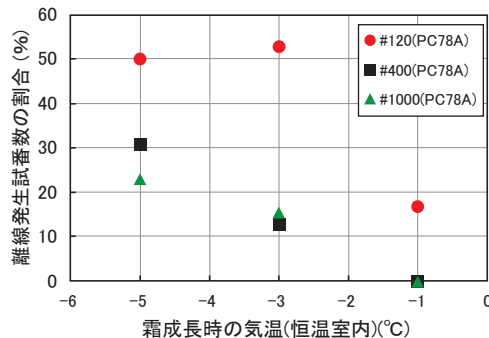


図7 霜成長時の気温と離線試験数の割合の関係

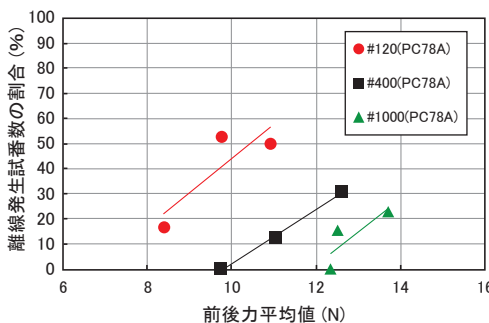


図8 前後力平均値と離線試験数の割合の関係

特集：電力技術

霜とはかなり異なった性状であった。一方、ミョウバンは、霜に近い細かな結晶がトリ線表面に析出し、外観上はトリ線の実際の着霜状態に近い状態となった。上記の結果から、本章ではミョウバンを霜の代替物質に選定した。

3.2 試験方法

ミョウバンを析出させた模擬トリ線をすり板によりしゅう動させる試験を行った。模擬トリ線は2章と同じ物を用い、しゅう動面の研磨は#1000の研磨紙を使用した。なお、化合物の水溶液をひと筆塗りで模擬トリ線に均等に塗布することが困難であったため、約300mm間隔毎に、ハケを水溶液につけ直して塗布した。

図10は本しゅう動試験の構成図を示す。2章で示した霜付着力測定試験装置を使用し、離線測定回路は、完全な離線時に2.9V、着線時に0Vを出力する回路とした。ただし、模擬トリ線の片側端部から長さ方向に275mmまでは、すり板の加速区間とするため、ミョウバン水溶液を塗布していない。レーザーセンサのレーザー光を模擬トリ線のミョウバン塗布面と塗布していない面の境界に照射し、すり板がミョウバン塗布領域に進入する時間を把握した。しゅう動最高速度は1.5m/s、加速度は20m/s²とした。

3.3 試験結果

ミョウバンは絶縁物であり、その切削粉がすり板の

表1 各化合物の水100mlに対する溶解量(g)

化合物	溶解量 (g)		
	20℃	50℃	80℃
塩化アンモニウム	37.2	50.4	65.6
スクロース	201.9	259.6	365.1
ミョウバン	5.9	17.0	71.0

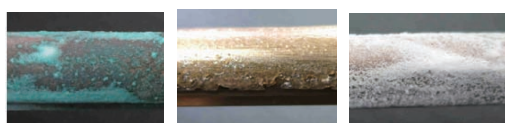


図9 塗布結果(左から塩化アンモニウム、スクロース、ミョウバン)

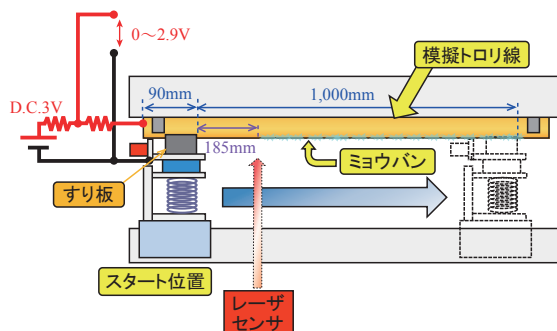


図10 霜付着力試験装置 構成図

しゅう動面に付着すると模擬トリ線との導通を障害する。そのため本試験では、すり板の進行方向に対して模擬トリ線をスタート位置で右に7mm、停止位置で左に7mm偏倚させることですり板へのミョウバン付着による導通障害の影響を低減した。試験条件として、模擬トリ線に塗布したミョウバン水溶液の濃度を1.4~9.6%の範囲で変化させた。本試験では、すり板が一定速度でミョウバン領域をしゅう動している区間を評価対象区間とし、前後力や接触力はこの区間での平均値や標準偏差を計算し、離線率は同区間における導通障害時間の割合として求めた。なお、試験毎にばらつきが大きいいため、各水溶液濃度毎に複数回の試験を実施した。図11、図12にその結果を示す。同図は、横軸がミョウバン水溶液濃度、縦軸がそれぞれ前後力平均値、離線率であり、プロットは複数試番の平均値を、図12の縦棒は標準偏差を示す。図11より、ミョウバン水溶液濃度の増加に対し、前後力の平均値はほぼ一定となっていることが分かる。一方、図12では、ばらつきはあるが離線率が水溶液濃度とともに増加する傾向があることが分かる。

3.4 霜とミョウバンによる試験結果の比較

2章で述べた霜の試験(以下、霜試験と表記)と、本章のミョウバンによる試験(以下、模擬試験と表記)を比較すると、前後力に関しては、本研究の条件においては霜試験、模擬試験ともに前後力平均値が10~20Nの範囲で得られている。また、離線率に関しても、霜試験では霜発生時の恒温室内気温が下がると離線率が上がるのに対し、模擬試験では、ミョウバン水溶液濃度を高くす

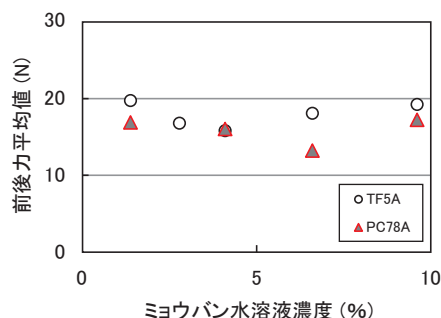


図11 前後力平均値のミョウバン水溶液濃度依存性

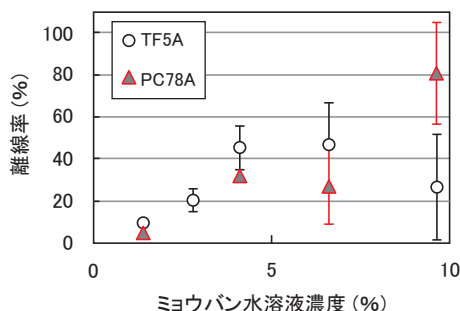


図12 離線率のミョウバン水溶液濃度依存性

ることと離線率の高い状況を再現することが可能である。

以上のように、トロリ線着霜時のすり板の機械的しゅう動状態における前後力や離線率に関しては、ミョウバンを霜の代替として使用することで、機械的な物性を完全に再現することはできないが、実際の着霜状態に近いしゅう動状態を模擬可能であることが分かった。模擬試験は常温環境下で実施可能であり、トロリ線長さの制限もない。本手法の活用によって、トロリ線着霜時におけるパンタグラフの動的なしゅう動挙動の調査や、すり板による霜の除去性能の評価などが可能であると考えられる。ただし、将来的に模擬試験をトロリ線に高電圧が印加された条件下で実施する場合は、霜とミョウバンの電気的特性の差異についても検討が必要である。

4. アークによる舟体損耗の再現試験

本章では、トロリ線着霜時に発生するアークが舟体を損耗させる事象を定置で再現する方法に関して述べる。

4.1 試験装置

図13はアークによる舟体損耗を模擬する試験装置の構成図である。同図のパンタグラフ総合試験装置は、パンタグラフ振動台に実機パンタグラフを設置し、パンタグラフ上部の模擬架線（剛体トロリ線）を取り付けた回転円盤を回転させることで、パンタグラフがトロリ線をしゅう動する状態を模擬する装置である。円盤を上下・左右方向に周期運動させてトロリ線の高さ変動や偏位を模擬する機能や、模擬架線からパンタグラフへ通電する機能も備えている。なお、本試験では円盤の上下加振は実施しない。本試験では、アークが舟体に与える影響を評価するため、銅製の模擬架線の一部（周長10mの1/12相当）をFRPに変えることで、FRP模擬架線がすり板を通過する際に強制的にアークを発生させる。

4.2 供試体

パンタグラフ総合試験装置は、印加電圧が100Vと実際の架線電圧に比べて低いため、アークの伸びる長さも

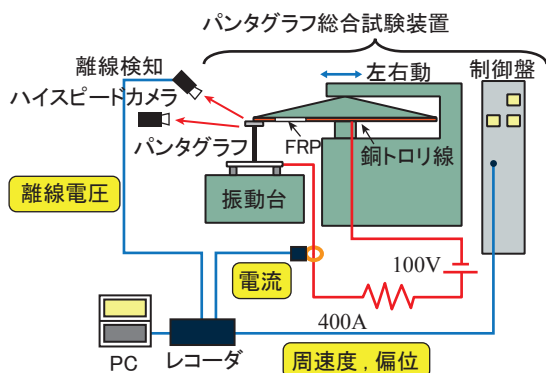


図13 アークによる舟体損耗を模擬する試験装置

実際の架線電圧の場合に比べて大幅に短くなる。営業線と同等の条件で試験を行うためには、実機パンタグラフの舟体に比べて非常に小さな寸法の縮尺舟体を製作する必要がある。しかし、縮尺舟体にはパンタグラフ総合試験装置でしゅう動可能な強度を具備することが求められるため、小型化には限界があり、本試験では約1/2の寸法の縮尺舟体を使用した。図14は縮尺舟体の外観であり、現用の新幹線用パンタグラフ枠組に設置して試験に供した。すり板は、新幹線で用いられている鉄系焼結合金すり板（T3-2）を用いた。図15にこの縮尺舟体の側面模式図を示す。なお、舟体のまくら木方向の幅は300mmである。本試験では、舟体後縁部材の板厚 t 、溶損防止剤高さ H_1 を変更し、試験を実施した。

4.3 試験方法

舟体後縁部材の板厚を0.5～10mm、溶損防止剤高さを1～16mmの範囲で変え、溶損防止剤が無い舟体後縁部材の試験も実施した。パンタグラフの向きは、なびき方向とした。パンタグラフ総合試験装置の設定は、回転円盤の周速度を50km/h、回転円盤の左右動の動作範囲を片振幅100mm、通電電流を直流400A、通電時間を約60秒とした。電流はクランプメータで測定し、アークの検知は鉄道総研が開発した紫外線検出式離線測定器⁴⁾を用いた。これらの測定器の信号と、パンタグラフ総合試験装置の制御盤から得られる回転円盤の回転速度、左右偏位の信号をデータレコーダで収録した。さらに、パンタグラフ後方側面からハイスピードカメラでアーク発生の様子を撮影した。

4.4 試験結果

図16に示すように、舟体後縁部にアークが発生する様子をハイスピードカメラで撮影した。カメラの露光時



図14 縮尺舟体

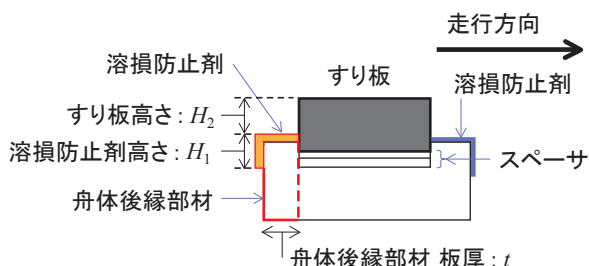


図15 縮尺舟体側面模式図

特集：電力技術

間は 0.05ms, サンプリング間隔は 1ms である。画像が全体的に暗いため、縮尺舟体の外形を破線で、模擬架線の外形を一点鎖線でそれぞれ同図に示す。また、アーク発生箇所を実線の円で囲んでいる。同図は、舟体後縁部材の板厚 1mm, 溶損防止剤高さ 1mm の条件であり、この条件での試験後の舟体後縁部材の様子を図 17 に示す。60 秒間通電した結果、溶損防止剤の下端付近にアークスポットが集中していることが確認された。これは、現車における舟体で一般的に観察される現象と同じである。

本章では、アークスポット数を離線回数で除した値を無次元化アークスポット数と定義する。図 18 は舟体後縁部材の板厚と無次元化アークスポット数との関係を示し、溶損防止剤高さでプロットを分けている。なお、溶損防止剤高さが 1, 2, 4mm の条件はプロットが重なったため、それらの平均値を図示している。本結果から、溶損防止剤がある場合には無次元化アークスポット数は板厚に依存せず、溶損防止剤高さが大きいほど無次元化アークスポット数が少なくなる傾向が確認される。一方、

溶損防止剤なしの条件では、溶損防止剤ありの条件に比べて無次元化アークスポット数が著しく増加していることが確認された。このように、本試験により、溶損防止剤の形状とアークによる舟体の損耗との定性的な関係を定置で調査可能であることが分かる。

ただし、現状は試験装置の印加電圧が 100V と実際の架線電圧に比べて低く、それに対する舟体の縮尺比も十分でないため、本試験により営業線において発生するアークによる舟体損耗状態を定量的に評価することは困難である。今後は、試験装置印加電圧の増加などの改良と組み合わせることで、アークに対する舟体の損耗をより定量的に評価できるようにしたいと考えている。

5. まとめ

本研究では、トロリ線着霜時の集電状態を常温環境下で再現する手法として、霜の代替物質を用いたしゅう動試験、アークによる舟体損耗の模擬試験を提案した。

- (1) 霜の代替物質としてミョウバンを選択し、模擬トロリ線にミョウバンを析出させてすり板によるしゅう動試験を実施したところ、すり板に作用する前後力は、霜の場合とほぼ同等であり、ミョウバン水溶液濃度を変化させることで離線発生状況を制御可能であることが分かった。
- (2) パンタグラフ総合試験装置の模擬架線の一部を FRP に変えることで強制的にアークを発生させるとともに、1/2 縮尺舟体を用いることにより、現車の舟体で一般的に観察されるアークによる損耗を定量的に再現できることが分かった。

これら 2 つの再現試験は、トロリ線着霜に起因するパンタグラフ舟体の損耗を防止する対策の検討に有用であり、今後活用していく予定である。

文 献

- 1) Y.Kamata, M.Shishido, T.Endo and S.Iikura : “Resolution of Frost-Phenomena Adherent to the Overhead Lines and a Study on Prediction Method of Overhead Line Frosting”, RTRI REPORT, Vol.22, No.1, pp.5-10, 2008.
- 2) 吉田光則 他 12 名:「着雪氷防止技術に関する研究(第1報)ー各種材料の着氷力についてー」, 北海道立工業試験場報告, No.292, pp.13-22, 1993
- 3) 南谷和行・本多正人・松本浩二・椿大輔:「SPM を利用したナノスケール場での金属冷却面への水の付着力の測定」, 環境工学シンポジウム, pp.189-190, 2015
- 4) 早坂高雅, 清水政利, 根津一嘉: 紫外線検出式離線測定装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.12, pp.17-22, 2008

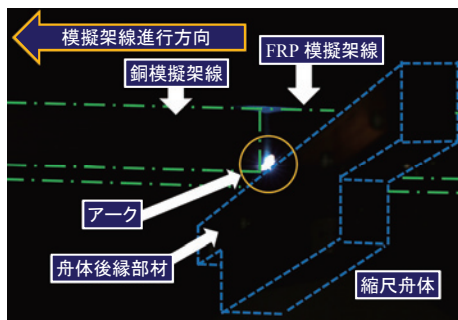


図 16 ハイスピードカメラによる画像

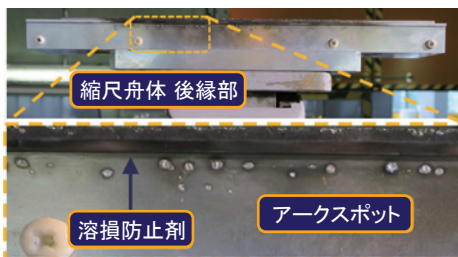


図 17 観測されたアークスポット

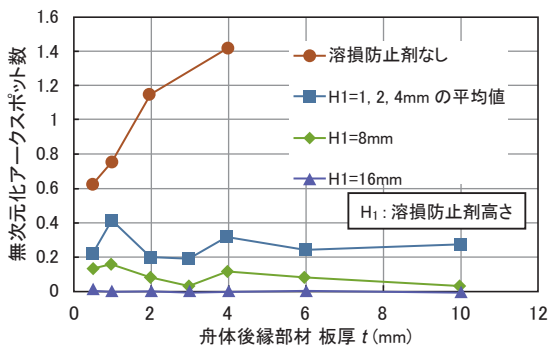


図 18 舟体後縁部材板厚とアークスポット数の関係